

## К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

В выпускаемых промышленностью низковольтных асинхронных двигателях добавочные потери достигают довольно значительной величины и намного превышают величину 0,5% от потребляемой мощности, принимаемой по ГОСТ 183—66. Особенно это относится к двигателям с короткозамкнутой алюминиевой обмоткой, залитой под давлением.

Так, например, согласно опытным данным [1], полученным при испытании 60 типоразмеров двигателей серии АО2 основного исполнения, добавочные потери в среднем составляют 2,2%, а полные добавочные потери — около 3,5% от потребляемой мощности. Они снижают фактический к. п. д. при номинальной нагрузке в среднем на 4%, повышают температуру обмотки в среднем на 22% и ухудшают механическую характеристику двигателей, особенно в пусковых режимах. В связи с этим вопросы расчета и снижения добавочных потерь приобретают очень важное значение.

Вопросу изучения добавочных потерь посвящено большое количество работ, из которых наиболее значительными являются работы Р. Рихтера [2] и Л. Дрейфуса [3]. В своем труде «Электрические машины» Р. Рихтер обобщил выпущенные до него работы и создал классическую теорию добавочных потерь. Методы расчета добавочных потерь, предложенные Рихтером и Дрейфусом, и до настоящего времени используются многими авторами [4—8]. Однако при расчете добавочных потерь по указанным методикам имеются расхождения с опытными данными. Так, в двигателях АО2—41—2 и АО2—42—2 потери, рассчитанные по методике Р. Рихтера, в 2,55 раза меньше опытных.

В данной статье рассматривается теория добавочных потерь в асинхронных двигателях, разработанная Рихтером и Дрейфусом, и даются рекомендации по ее уточнению.

Основными причинами возникновения добавочных потерь в асинхронных двигателях являются высшие гармоники поля в воздушном зазоре, которые перемещаются относительно поверхности статора и ротора и наводят вихревые токи на поверхности зубцов (поверхностные потери), в теле зубцов (пульсационные потери) и в клетке ротора (добавочные потери в клетке ротора).

Дрейфус рассматривает и добавочные потери от высших гармоник на вихревые токи в спинке и потери от высших гармоник на гистерезис. Однако эти потери составляют незначительную величину, поэтому ими можно пренебречь.

Кроме того, в асинхронном двигателе существуют добавочные потери основной частоты [1] и, как показали испытания, — поверхностные потери в алюминиевом шлице. Эти потери не рассматриваются в работах Рихтера и Дрейфуса.

### Высшие гармоники поля в воздушном зазоре двигателя

Рихтер и Дрейфус рассматривают два вида высших гармоник поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя: гармоники, возникающие вследствие раскрытия пазов, и гармоники, возникающие вследствие ступенчатой формы МДС

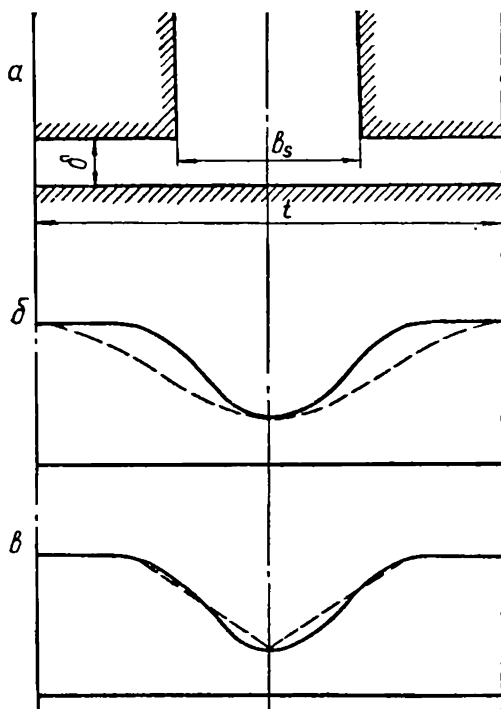


Рис. 1. Поле в воздушном зазоре двигателя при односторонней зубчатости, вызванной раскрытием пазов:

$a$  — пазовая зона;  $b$  — кривая поля, — — — допущение Рихтера;  $в$  — кривая поля, — — — допущение Дрейфуса.

из-за размещения обмотки в пазах (гармоники МДС).

Гармоники от раскрытия пазов. Ввиду раскрытия пазов в кривой поля под пазами образуются провалы. Распределение поля в воздушном зазоре на поверхности гладкого ротора Рихтер и Дрейфус определяют аналитически с помощью конформных отображений со следующими допущениями:

1) пренебрегают кривизной поверхности статора и ротора в воздушном зазоре;

2) глубину паза принимают бесконечно большой;

3) магнитную проницаемость принимают равной бесконечности.

Однако ввиду сложной картины распределения поля для упрощения решения задачи Рихтер и Дрейфус делают дальнейшие существенные допущения. Рихтер заменяет

полученную кривую поля полем синусоидальной формы с амплитудой, равной половине провала, и длиной волны, равной зубцовому делению (рис. 1, б). Дрейфус заменяет реальную кривую поля равновеликим равнобедренным треугольником (рис. 1, в).

На основании экспериментальных исследований, проведенных нами на моделях с односторонней зубчатостью, установлено, что кривая поля существенно отличается от синусоидальной и треугольной формы. При некоторых соотношениях  $\frac{b_s}{\delta}$  и  $\frac{b_s}{t}$  это различие становится значительным и зубцовая гармоника второго порядка становится соизмерима с зубцовой гармоникой первого порядка.

**Гармоники МДС.** Ступенчатую кривую МДС Рихтер раскладывает на 2 кривые: плавную и пилообразную. Плавная кривая обуславливает гармоники порядка ниже зубцового  $v < \frac{z}{p} - 1$ , пилообразная — гармоники зубцового порядка  $v = k \frac{z}{p} \pm 1$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$

Кривую поля Рихтер и Дрейфус определяют при односторонней зубчатости.

Для гармоник порядка ниже зубцового они учитывают уменьшение поля

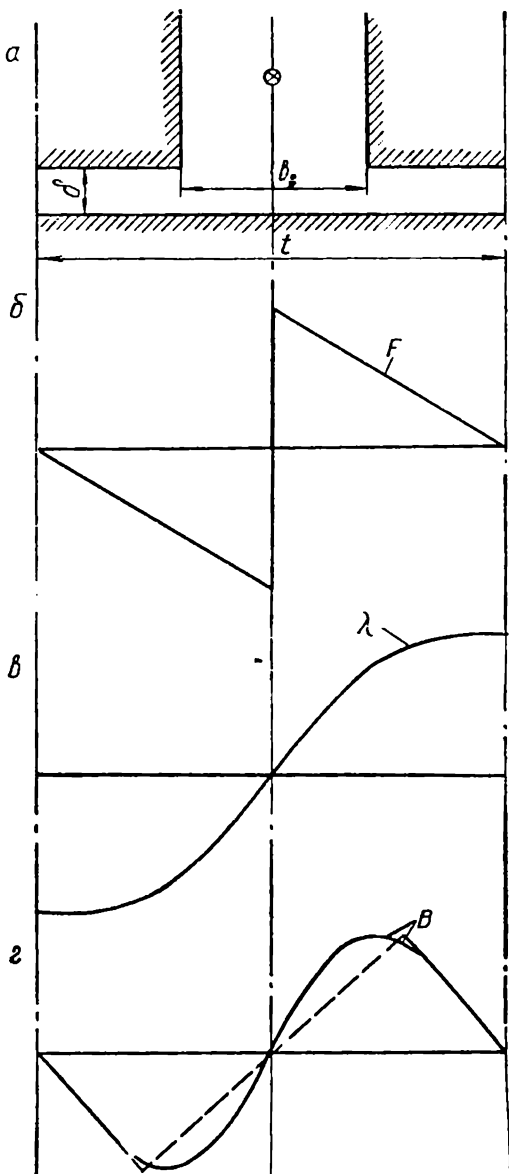


Рис. 2. Поле в воздушном зазоре двигателя, вызванное зубцовыми гармониками МДС:

а — пазовая зона; б — кривая МДС; в — кривая проводимости под пазом, занятым током;  $\lambda$  — кривая поля по Рихтеру, — — — — по Дрейфусу.

гармоники от пазовости только умножением на  $1/k_r$ . Для гармоник зубцового порядка они определяют кривую поля под пазом, занятым током, как произведение МДС (рис. 2) на величину проводимости в одной и той же точке воздушного зазора. Далее Рихтер раскладывает полученную кривую в ряд Фурье и учитывает влияние пазовости при занятости паза током с помощью коэффициента, определяемого по кривым в зависимости от соотношений  $\frac{b_s}{\delta}$  и  $\frac{b_s}{t}$ . При расчете поверхностных потерь этот коэффициент дается для суммы гармоник, а пульсационных потерь и потерь в клетке ротора — только для первой зубцовой гармоники.

Дрейфус заменяет полученную кривую кривой треугольной формы и раскладывает ее в ряд Фурье. Влияние пазовости при занятости паза током он учитывает для каждой зубцовой гармоники коэффициентом, определенным графоаналитически в зависимости от соотношений  $\frac{bs}{\delta}$  и  $\frac{bs}{t}$ .

### Поверхностные потери в стали

Рихтер использует при расчете поверхностных потерь в стали теоретическую формулу для массивного ротора, а значения коэффициента поверхностных потерь берет из экспериментальных данных, полученных на шихтованном полюсе. Указанное допущение нам кажется неверным, так как картины распределения вихревых токов в массивном и шихтованном сердечниках совершенно различны. Поэтому формула Рихтера нуждается в уточнении. Кроме того, он не учитывает влияния зубчатости ротора на величину поверхностных потерь. Дрейфус учитывает зубчатость ротора только при определении поверхностных потерь графоаналитическим методом.

При расчете поверхностных потерь от раскрытий пазов Рихтер находит поверхностные потери только от первой зубцовой гармоники. Рихтер и Дрейфус не определяют поверхностные потери от гармоник МДС порядка ниже зубцового  $\nu < \frac{z}{p} - 1$ , в то время как при диаметральном шаге величина потерь от этих гармоник велика. Коэффициентом поверхностных потерь в формулах Рихтера и Дрейфуса не учитываются конструкция и технология изготовления двигателя, в частности, влияние способа заливки ротора. Поэтому при уточнении методики расчета поверхностных потерь необходимо:

- 1) проверить формулу Р. Рихтера для шихтованного ротора;
- 2) произвести расчет потерь для каждой гармоники;
- 3) проверить величину потерь для гармоник ниже зубцового порядка;

4) учесть влияние зубчатости ротора на величину потерь от гармоник статора и наоборот;

5) определить зависимость коэффициента поверхностных потерь от конструкции и технологии изготовления двигателя.

### Пульсационные потери в стали

Дрейфус приводит формулы, пригодные только для фазных машин. Рихтер определяет эти потери только для первой зубцовой гармоники от раскрытия пазов и МДС. При определении амплитуды пульсации индукции в зубцах от зубцовой гармоники, вызванной раскрытием пазов, Рихтер не учитывает влияния соотношения пазов на статоре и роторе. Согласно Рихтеру, пульсации могут отсутствовать при определенном соотношении числа пазов на статоре и роторе и при открытых пазах. Рихтер также не учитывает демпфирование потока в зубце от токов высших гармоник в короткозамкнутом контуре вокруг зубца в роторе с короткозамкнутой обмоткой, залитой алюминием.

Экспериментальные исследования, проведенные нами на обращенной машине с короткозамкнутой обмоткой на статоре без скоса пазов, показали, что короткозамкнутая обмотка многократно снижает поток в зубце для различных гармоник. Рихтер не учитывает уменьшения потерь от вытеснения тока высших гармоник в листах стали, а также потери от гармоник порядка ниже зубцовых.

При уточнении методики расчета пульсационных потерь необходимо:

- 1) произвести расчет потерь для каждой гармоники;
- 2) проверить величину потерь от гармоник МДС порядка ниже зубцовых;

- 3) учесть влияние соотношения числа пазов на статоре и роторе на величину пульсации индукции в зубце от гармоник, вызванных раскрытием пазов;

- 4) учесть влияние демпфирования потока в зубцах ротора с короткозамкнутой обмоткой ротора, залитой алюминием;

- 5) учесть влияние вытеснения тока высших гармоник в листах стали;

- 6) определить коэффициент пульсационных потерь для сталей, применяемых в настоящее время.

### Добавочные потери в клетке ротора

Рихтер и Дрейфус дают формулы расчета потерь только при изолированной клетке ротора, причем потери от раскрытия пазов Дрейфус не определяет, а Рихтер их определяет только для первой зубцовой гармоники.

Расчет добавочных потерь в клетке ротора с неизолированными стержнями ротора от гармоник МДС обмотки статора подробно рассмотрен А. Одоком [9], который при определении гармоник поля пазовость статора учитывает только коэффициентом  $1/k_p$  для всех гармоник.

При уточнении методики расчета добавочных потерь необходимо:

1) при неизолированной клетке ротора определить потери от поперечных токов, протекающих между соседними стержнями клетки ротора и вызванных высшими гармониками МДС и раскрытием пазов;

2) расчет потерь произвести для каждой гармоники, в том числе для гармоник порядка ниже зубцового  $\nu < \frac{z}{p} - 1$ , для зубцовых гармоник МДС и от раскрытия пазов.

## ВЫВОДЫ

Классическая теория добавочных потерь в асинхронных двигателях и методика их расчета, разработанная Рихтером и Дрейфусом, требуют дальнейших уточнений, из которых главными являются:

1. Определение кривой поля высших гармоник МДС и от раскрытий пазов в воздушном зазоре двигателя производить с минимальными допущениями, после чего указанную кривую раскладывать в ряд Фурье, находя амплитуды индукций поля высших гармоник.

2. При определении полей от высших гармоник МДС учесть уменьшение поля под пазом, занятым током, для всех высших гармоник.

3. Уточнить формулу для расчета поверхностных потерь в стали для шихтованного ротора (статора).

4. При расчете поверхностных потерь в стали от высших гармоник статора (ротора) учесть влияние зубчатости ротора (статора).

5. При расчете пульсационных потерь учесть влияние соотношения числа пазов статора и ротора на величину пульсации индукции в зубцах от гармоник, вызванных раскрытием пазов, а также влияние вытеснения тока высших гармоник в листах стали зубцов ротора и статора.

6. При короткозамкнутой обмотке ротора учесть в расчете пульсационных потерь влияние демпфирования потока в зубцах ротора.

7. Уточнить коэффициенты поверхностных и пульсационных потерь.

8. Учесть потери основной частоты и поверхностные потери

от высших гармоник в алюминиевом шлице стержней к. з. обмотки ротора.

9. Уточнить количество гармоник, для которых необходимо производить расчет добавочных потерь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Ганцев. Полные добавочные потери в асинхронных двигателях серии АО2. «Электротехника», 1970, № 8.
  2. Р. Рихтер. Электрические машины. М., ОНТИ. Т. 1—4, 1935—1939.
  3. Л. Дрейфус. Теория добавочных потерь в железе 3-фазных асинхронных машин. А. f. E., 1928, В20.
  4. Б. Геллер, В. Гамата. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. М., «Энергия», 1964.
  5. Я. Б. Данилевич, Э. Г. Кашарский. Добавочные потери в электрических машинах. М., ГЭИ, 1963.
  6. Т. Г. Сорокер. Многофазный асинхронный двигатель и преобразователь частоты (поверочный расчет). М., НИИЭлектром, 1959.
  7. Я. А. Танков. Расчет потерь в обмотке короткозамкнутого ротора от высших гармоник н. с. обмотки статора в трехфазных асинхронных двигателях. «Электромеханика», 1958, № 7.
  8. В. Шуйский. Расчет электрических машин. М., «Энергия», 1968.
  9. A. Odok. Zusatzverluste und zuratzmomente in Kurzschlussanker motoren mit unisolieren Stäben Zürich, 1955.
-